

На правах рукописи



Филатов Антон Юрьевич

**МАСШТАБИРУЕМЫЕ АЛГОРИТМЫ ОДНОВРЕМЕННОГО  
ПОСТРОЕНИЯ КАРТЫ И ЛОКАЛИЗАЦИИ СТАИ МОБИЛЬНЫХ  
РОБОТОВ**

05.13.11. – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин,  
комплексов и компьютерных сетей

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена на кафедре математического обеспечения и применения ЭВМ федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»).

**Научный руководитель: Кринкин Кирилл Владимирович**

кандидат технических наук, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», кафедра обеспечения и применения ЭВМ, заведующий кафедрой

**Оппоненты:**

**Рыжов Владимир Александрович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики и математического моделирования ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», г. Санкт-Петербург

**Капитонов Александр Александрович**

кандидат технических наук, доцент факультета инфокоммуникационных технологий ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», г. Санкт-Петербург

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»

Защита состоится 22 декабря 2021 г. В 15:30 на заседании диссертационного совета Д 212.238.01, созданном при Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)» и на сайте университета [www.etu.ru](http://www.etu.ru)

Автореферат разослан 21 октября 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета:



кандидат технических наук, доцент,  
Пазников Алексей Александрович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** В диссертационной работе проводится исследование методов и алгоритмов одновременной локализации и построения карты стаи мобильных роботов. Стая – набор автономных роботов для совместного построения модели пространства, имеющих сопоставимое техническое оснащение для наблюдения окружающей среды в ограниченной окрестности, не имеющих иерархии и обменивающихся информацией друг с другом. Алгоритмы одновременной локализации и построения карты применяются в различных сервисных, медицинских, производственных, научных приложениях (в частности, для автоматизации логистики в складских помещениях, автономной доставки грузов роботами-курьерами внутри офисных пространств, медицинских учреждений). Одна из задач, которая ставится перед такими роботами – ориентация на местности. От того, насколько точна карта местности, построенная в памяти бортового компьютера и по которой движется автономный робот, зависит точность построения маршрута движения. Немаловажную роль играет определение собственного положения на этой карте. Определять собственное положение необходимо с точностью, сопоставимой с габаритами мобильного робота, а для этого не всегда достаточно внешних данных (например, данных системы спутниковой навигации, такой как GPS).

Для обеспечения точной локализации применяются алгоритмы, решающие задачу SLAM (англ. Simultaneous Localization and Mapping) – одновременного определения собственного положения и построения карты. Обычно задача SLAM является дополнительной к основному набору задач, решаемому роботом. Если затраты на подготовку карты слишком велики или известно, что построить карту местности требуемой точности вообще невозможно, целесообразно строить карту по мере работы алгоритма без использования заранее заготовленной. Например, роботу-курьеру можно предоставить карту города, по которому он будет двигаться. Однако невозможно на этой карте отметить все неровности дороги, динамически возникающие на пути препятствия (люди, автомобили, дороги, перекрытые для проведения ремонтных работ). Роботу-пожарному можно

предоставить план здания, но на нем не будут отмечены перегороденные вследствие пожара дверные проемы.

Алгоритм, разработанный в рамках данного диссертационного исследования предназначен для локализации внутри помещений роботов, скорость движения которых измеряется десятками сантиметров в секунду. Разработанный алгоритм может выполняться одновременно несколькими роботами-агентами, которые совместно строят карту местности. В дальнейшем мобильный робот будет именоваться **агентом**, если в контексте необходимо подчеркнуть его роль и алгоритмы, которые он выполняет; и **роботом**, если речь идет о физическом оснащении. Использование нескольких агентов, работающих сообща, позволяет ускорить построение карты и увеличить точность локализации каждого робота в отдельности. Увеличение точности по сравнению с одноагентным алгоритмом достигается за счет того, что каждый агент не только дополняет, но и проверяет карту других агентов.

**Целью данной работы** является разработка масштабируемых алгоритмов для многоагентного решения задачи SLAM, применимых для роботов с ограниченными вычислительными ресурсами. В контексте данной работы роботом является передвижная платформа, оснащенная вычислительным устройством, а также **лидаром** – датчиком, который может измерять расстояние до препятствий, окружающих робота. Ограничение ресурсов распространяется в первую очередь на вычислительное устройство, анализ применимости различных лидаров в данной работе не проводится. Робот с ограниченными вычислительными ресурсами – это робот, имеющий ограниченные вычислительную мощность и объем оперативной памяти, небольшие размеры и питание от портативной батареи. На текущий момент типичными представителями таких устройств являются продукты Raspberry Pi или Jetson Nano.

В рамках поставленной цели мобильный робот, решающий задачу SLAM, является автономным; единственным источником данных об окружающей среде является лидар.

Во время выполнения данной работы были **поставлены и решены следующие задачи.**

1. Классификация и сравнительный анализ существующих одноагентных и многоагентных алгоритмов, решающих задачу SLAM.
2. Разработка масштабируемого многоагентного алгоритма SLAM на базе теории Демпстера-Шафера.
3. Разработка алгоритма фильтрации двумерных лазерных сканов для экономии вычислительных ресурсов.
4. Программная реализация масштабируемого многоагентного алгоритма решения задачи SLAM.
5. Оценка точности карты и траектории, построенных в результате работы многоагентного алгоритма, а также производительности на вычислительных устройствах с ограниченными ресурсами.

**Объектом исследования** является взаимодействие стаи мобильных роботов при решении задачи одновременного построения карты и локализации.

**Предметом исследования** является архитектура, точность и быстродействие многоагентного алгоритма, решающего задачу одновременного определения положения и построения карты.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использовались методы математической статистики, теории вероятностей, теории графов.

**На защиту диссертационной работы выносятся следующие положения.**

1. Масштабируемые метод и алгоритм решения многоагентной задачи SLAM на базе теории Демпстера-Шафера, которые позволяют снизить требования к вычислительным ресурсам.
2. Масштабируемый корреляционный фильтр двумерных лазерных сканов для многоагентного алгоритма SLAM, обеспечивающий снижение размерности входных данных.
3. Архитектура программного обеспечения, реализующего масштабируемый многоагентный алгоритм, решающий задачу SLAM.

**Научная новизна работы** заключается в следующем.

1. Предложен многоагентный горизонтально масштабируемый алгоритм решения задачи SLAM для стаи мобильных роботов на базе теории Демпстера-Шафера, строящий карту окружения. Применение этой теории позволяет увеличить точность построенной карты, а также уменьшить влияние шумов по сравнению с классической Байесовской теорией.

2. Разработан алгоритм фильтрации двумерных лазерных сканов на базе построения гистограмм и вычисления коэффициента корреляции Пирсона, позволяющий обрабатывать только часть входных данных без ущерба для точности.

3. Разработана масштабируемая архитектура компонентов многоагентного алгоритма SLAM, допускающая выход из строя любого числа агентов, кроме одного последнего.

**Теоретическая значимость** работы заключается в применении теории Демпстера-Шафера к модели карты занятости, которая строится в процессе работы алгоритма, решающего задачу SLAM. В работе получены закономерности, связывающие параметры алгоритма и характеристики мобильного робота и увеличивающие за счет этого точность построения карты и локализации.

**Практическая значимость.** Разработанные алгоритмы и программное обеспечение могут быть применены для решения задачи одновременной локализации и построения карты при одновременной работе нескольких мобильных роботов. В частности, они могут быть использованы для роботов-курьеров, сервисных и складских роботов. Поскольку разработанные методы и алгоритмы нацелены на сокращение требований к вычислительным ресурсам, то их применение позволит понизить стоимость производства таких роботов и более эффективно использовать вычислительные ресурсы.

**Апробация результатов.** Результатом выполнения диссертационной работы является разработанный многоагентный алгоритм решения задачи SLAM и реализующее его программное обеспечение. Промежуточные результаты были представлены на конференциях FRUCT, проходивших с 2016 по 2019 год, на

семинарах по позиционированию транспортных средств АО «НИИАС» РЖД в 2019 и 2020 годах.

**Публикации.** Во время выполнения работы было получено 1 свидетельство о регистрации ПО для ЭВМ, а также 9 публикаций в научных изданиях, среди которых 2 публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК, 7 публикаций в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus, среди которых одна работа в журнале Q2 и одна – в журнале Q1.

**Достоверность и обоснованность** представленных в диссертационной работе научных выводов подтверждается согласованностью теоретических и практических результатов, корректностью доказательств, а также апробацией основных теоретических положений в научных статьях и выступлениях на научных конференциях. Достоверность результатов диссертационной работы также подтверждается проведенными экспериментами с использованием программной реализации многоагентного масштабируемого алгоритма одновременной локализации и построения карты стаи роботов.

**Внедрение результатов работы.** Научные результаты, полученные в результате работы над диссертацией были внедрены в учебный процесс СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина).

**Личный вклад автора.** Все результаты, изложенные в диссертации и сформулированные в положениях, выносимых на защиту, получены автором лично или при его непосредственном участии.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 55 наименований. Объем работы 111 машинописных страниц, она содержит 39 рисунков, 3 таблицы.

**Соответствие паспорту специальности.** Данная диссертация выполнена в соответствии с паспортом специальности 05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей, отрасль – технические науки. Диссертация соответствует пунктам 1, 3, 9 паспорта специальности 05.13.11: п. 1 – Модели, методы и алгоритмы

проектирования и анализа программ и программных систем, их эквивалентных преобразований, верификации и тестирования; п. 3 – Модели, методы, алгоритмы, языки и программные инструменты для организации взаимодействия программ и программных систем; п. 9 – Модели, методы, алгоритмы и программная инфраструктура для организации глобально распределенной обработки данных.

### **Содержание работы.**

**В первой главе** проведен обзор литературы по методам решения задачи одновременной локализации и построения карты. На основе рассмотренных алгоритмов проведена классификация существующих подходов к решению этой задачи.

*По размерности наблюдений* алгоритмы можно разделить на **двумерные и трехмерные**.

*По типу используемых сенсоров* можно выделить **лазерные и визуальные** алгоритмы.

*По способу обработки входных измерений* алгоритмы можно разделить на **класс алгоритмов, основанных на выделении особых точек**, а также **класс алгоритмов, использующих «сырые» измерения**.

*По способу представления карты* можно выделить **алгоритмы, использующие сетку занятости или графовые алгоритмы**.

*По характеру изменения окружающей среды* алгоритмы разделяются на **статические и динамические**.

Вне зависимости от принадлежности алгоритма к тому или иному классу, можно выделить высокоуровневую структуру алгоритма решения задачи одновременной локализации и построения карты. Основные компоненты алгоритма представлены на рисунке 1.



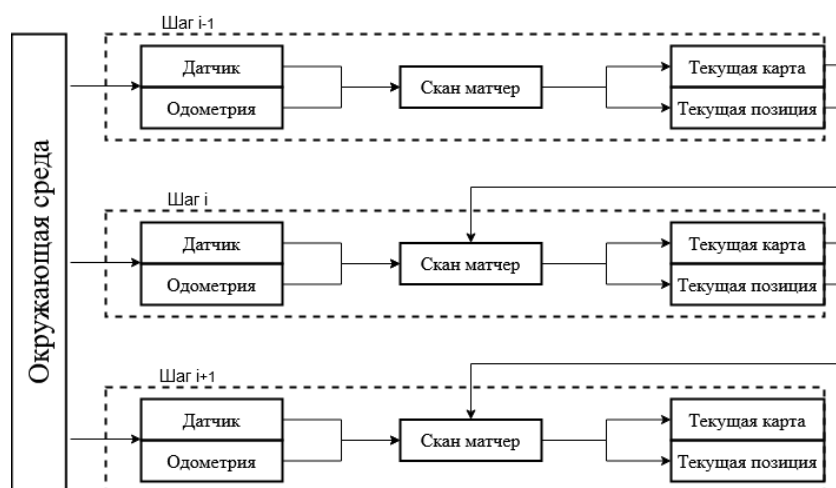


Рисунок 1 – Основные компоненты алгоритма решения задачи одновременной локализации и построения карты

**Во второй главе** формулируются дополнительные задачи, которые возникают при описании многоагентного алгоритма, решающего задачу одновременной локализации и построения карты.

1. Определить роли мобильных агентов.
2. Определить способ вычисления взаимного расположения агентов.
3. Определить способ объединения карт.
4. Определить, что является выходными данными.

Среди многоагентных алгоритмов большой популярностью пользуются алгоритмы, роли агентов в которых распределяются неравномерно. Обычно в стае агентов присутствует «ведущий агент», который корректирует поведение всех остальных. Ключевой недостаток таких алгоритмов заключается в том, что выход из строя «ведущего» приводит либо к потере работоспособности системы, либо к необходимости выбора нового «ведущего».

Кроме того, многоагентные алгоритмы разделяются по количеству информации о первоначальном положении роботов в системе. На практике часто невозможно определить начальную позицию робота с погрешностью менее нескольких сантиметров, поэтому алгоритмы, вычисляющие взаимное расположение агентов без использования априорных знаний, имеют более широкую область применения.

К требованиям о принадлежности разрабатываемого алгоритма к классу двумерных неграфовых одноагентных алгоритмов, описанным в главе 1, добавляются требования о структуре агентов. Для обеспечения масштабируемости системы необходимо, чтобы все агенты выполняли одинаковые функции: и наблюдение за окружающей средой, и обработку полученных данных, и выбор времени для синхронизации. Помимо этого, вместо использования априорного знания о начальном расположении агентов необходимо вычислять взаимное расположение агентов во время их синхронизации.

Третья глава содержит описание архитектуры разработанного многоагентного алгоритма одновременной локализации и построения карты. Схема компонентов, участвующих в выполнении этого алгоритма показана на рисунке 2.

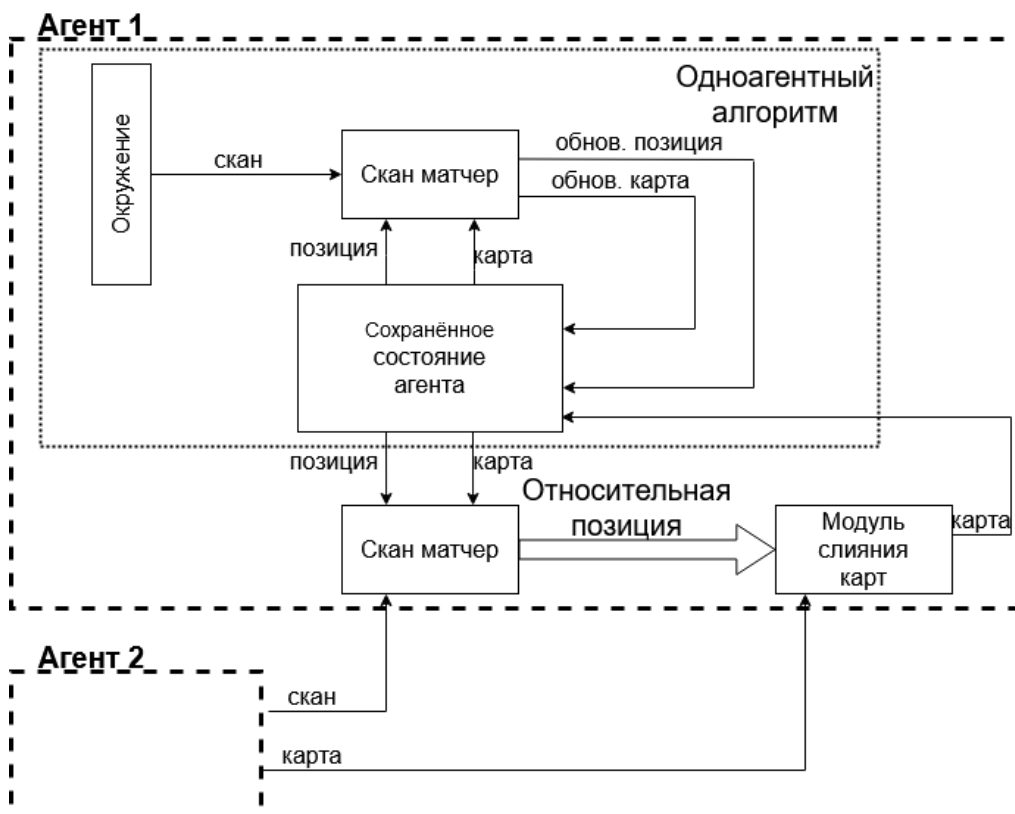


Рисунок 2 – Схема компонентов, участвующих в выполнении разработанного многоагентного алгоритма

Определение того, что один агент находится в прямой зоне видимости другого, осуществляется посредством некоторого отдельного сенсора. Выбор такого сенсора не лежит в рамках данной работы, однако для примера можно использовать технологию передачи данных bluetooth, которая предполагает дальность действия сигнала не более нескольких метров.

Когда агенты находятся близко друг к другу, они могут начинать процесс обмена построенными картами. Карта – это структура данных, которая содержит ячейки, включающие в себя информацию о собственных координатах в карте, а также вероятность ячейки быть занятой. Когда агенты встречаются, построенные ими карты обязательно будут иметь общую часть, поскольку они оба наблюдают и добавляют в карту одну и ту же часть окружения в момент встречи. Кроме карт агенты передают друг другу текущий лазерный скан. Это нужно для того, чтобы применить алгоритм скан матчера, аналогичный тому, который работает в ядре каждого агента при решении обычной задачи SLAM.

При помощи скан матчера по карте одного агента, а также лазерному скану другого агента определяется взаимное расположение агентов. После этого начинается процесс объединения карт. Второй агент передает первому построенную карту. В простом случае слияние карт состоит из перебора всех ячеек обеих карт и выбора или наибольшего, или наименьшего, или среднего значения занятости соответствующих клеток. В этой главе описано применение теории Демпстера-Шафера в задаче слияния карт. Эта теория применяется при вычислении вероятности каждой ячейки результирующей карты быть занятой.

Следуя теории Демпстера-Шафера, клетка карты имеет четыре состояния, каждое из которых имеет вероятность: состояние быть занятой с вероятностью  $p$ , быть свободной с вероятностью  $q$ , быть неисследованной с вероятностью  $u$ , а также быть в невозможном, конфликтующем состоянии с вероятностью  $v$ . Эти четыре вероятности связаны между собой тождеством  $p + q + u + v = 1$ . Согласно теории Демпстера-Шафера, неисследованное состояние – это состояние, когда ячейка может быть и занята, и свободна, об этом пока просто нет информации. Конфликтующее состояние – это состояние, при котором ячейка ни занята, ни

свободна. Это математическая абстракция, которая не встречается в реальном мире, однако, введение состояния конфликта позволяет усилить формулы классической Байесовской вероятности.

Во время объединения вероятностей ячеек, составляющих карту, применяется правило объединения вероятностей, описываемое формулой

$$m_{1,2}(A) = (m_1 \oplus m_2)(A) = \frac{1}{1 - K} \sum_{B \cap C = A \neq \emptyset} m_1(B)m_2(C), \quad (1)$$

где  $A, B, C$  – это различные состояния, такие как ячейка является свободной, занятой или неизвестно (свободной или занятой),  $m$  – это вероятность состояния,  $K$  – вычисляется по формуле

$$K = \sum_{B \cap C = \emptyset} m_1(B)m_2(C). \quad (2)$$

Более детально объяснить величину занятости ячейки карты  $m_{12}(p)$  можно, если в формулу (1) подставить конкретные вероятности занятости, свободы и неизвестности ячейки:

$$m_{12}(p) = \frac{m_1(p) \cdot m_2(p) + m_1(p) \cdot m_2(u) + m_1(u) \cdot m_2(p)}{1 - (m_1(p) \cdot m_2(q) + m_1(q) + m_2(p))}, \quad (3)$$

где  $m_1, m_2, m_{12}$  – это вероятности состояния клетки,  $p$  – занятое состояние,  $q$  – свободное состояние,  $u$  – неизвестное состояние, то есть состояние, когда клетка одновременно и занята, и свободна.

Применение теории Демпстера-Шафера позволяет сделать карту более устойчивой к погрешности лидара, а также некоторым промахам скан матчера.

**В четвертой главе** описан горизонтально масштабируемый алгоритм фильтрации лазерных сканов, выполняющий предобработку входных данных для описанного в главе 3 многоагентного масштабируемого алгоритма решения задачи SLAM. Идея фильтра основана на сохранении нескольких последовательных сканов в скользящем окне и сравнении каждого нового скана со сканами из этого окна. Если новый скан сильно коррелирует с каждым сканом из окна, его следует отбросить.

Горизонтальное масштабирование алгоритма достигается за счет распределения вычислений самого трудоемкого этапа фильтрации – предобработки входных данных. Входными данными является лазерный скан, который может содержать от десятков тысяч до десятков миллионов точек, которые возможно обрабатывать параллельно.

В качестве коэффициента корреляции был выбран коэффициент Пирсона, рассчитываемый по формуле:

$$P_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y}, \quad (4)$$

где  $X, Y$  – случайные величины, представляющие собой значения расстояний, составляющих два лазерных скана,

$\text{cov}$  – ковариация этих случайных величин,

$\sigma_X, \sigma_Y$  – дисперсия случайных величин  $X$  и  $Y$ .

Схема предложенного алгоритма фильтрации представлена на рисунке 3.

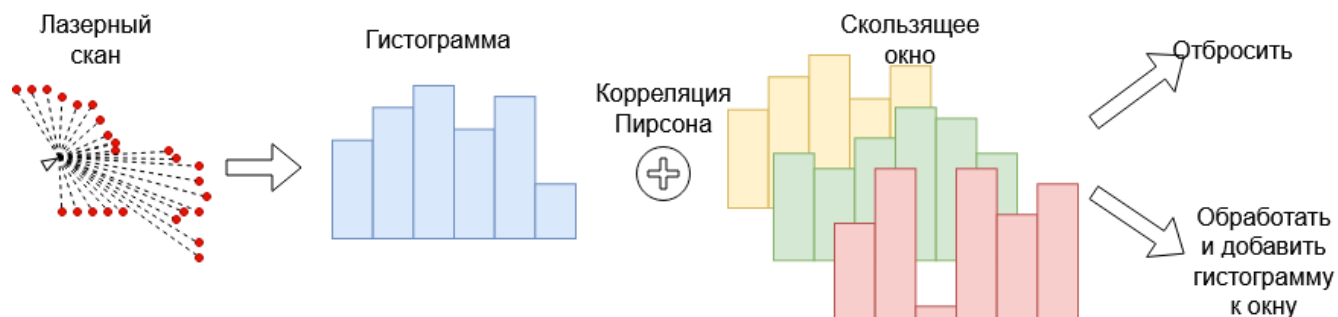


Рисунок 3 – Схема алгоритма фильтрации

Результат применения алгоритма фильтрации можно увидеть в таблице 1. В таблице 2 указано соответствие номера последовательности данных с ее названием в наборе данных.

В качестве набора данных, на котором проводилось тестирование, был выбран набор данных от Массачусетского Технологического университета, поскольку в этом наборе данных присутствуют как данные лидаров, так и истинная траектория движения роботов, благодаря которой можно количественно оценивать результаты работы алгоритмов.

Таблица 1. Среднеквадратичное отклонение траектории (в метрах), построенное алгоритмами SLAM с фильтром и без, от истинной траекторией движения робота.

№	СКО vinySLAM	СКО vinySLAM с фильтром	СКО cartographer	СКО cartographer с фильтром	% отброшено
1	0.062 ± 0.004	0.078 ± 0.004	0.131 ± 0.058	0.119 ± 0.041	59
2	0.080 ± 0.018	0.089 ± 0.013	0.153 ± 0.072	0.163 ± 0.094	56
3	0.096 ± 0.007	0.111 ± 0.013	0.183 ± 0.015	0.181 ± 0.014	59
4	0.094 ± 0.006	0.100 ± 0.002	0.176 ± 0.010	0.179 ± 0.012	63
5	0.170 ± 0.019	0.121 ± 0.006	0.248 ± 0.014	0.251 ± 0.007	52
6	0.534 ± 0.085	0.543 ± 0.034	0.586 ± 0.174	0.642 ± 0.191	58
7	0.090 ± 0.020	0.090 ± 0.003	0.130 ± 0.025	0.119 ± 0.017	52
8	0.183 ± 0.014	0.213 ± 0.027	0.188 ± 0.011	0.185 ± 0.011	51
9	0.305 ± 0.174	0.289 ± 0.181	0.188 ± 0.004	0.189 ± 0.005	50
10	0.361 ± 0.175	0.348 ± 0.152	0.378 ± 0.025	0.399 ± 0.030	47

Таблица 2. Соответствие номера последовательности данных с ее названием в наборе данных MIT.

№	Последовательность данных	№	Последовательность данных	№	Последовательность данных
1	2011-01-20-07-18-45	2	2011-01-21-09-01-36	3	2011-01-24-06-18-27
4	2011-01-25-06-29-26	5	2011-01-27-07-49-54	6	2011-03-11-06-48-23
7	2011-03-18-06-22-35	8	2011-04-06-07-04-17	9	2011-01-19-07-49-38
10	2011-01-28-06-37-23				

В таблице 1 показаны значения средних отклонений выходных траекторий от истинных на различных последовательностях данных из набора данных MIT. Рассматривались такие SLAM алгоритмы, как vinySLAM и Google Cartographer. Из таблицы следует, что точность алгоритма при использовании фильтрации в среднем не изменяется, но обработано менее половины лазерных сканов. Таким образом удалось сохранить точность работы алгоритма, потратив значительно меньше времени на обработку входных данных

В пятой главе рассмотрено тестирование характеристик точности и производительности разработанного программного обеспечения на основе многоагентного алгоритма, представленного в главе 3.

Программная реализация основана на фреймворках ROS<sup>1</sup> и slam-structor<sup>2</sup>. Результаты тестирования показали, что среднеквадратичная ошибка многоагентного алгоритма на дистанции 100 метров, пройденной одним агентом, при условии однократной синхронизации с другим агентом, составила 9,4 см. Исследование производительности показало, что разработанный алгоритм может обрабатывать до 24 лазерных сканов в секунду на платах модели Raspberry Pi 3 Model B+, обладающими ограниченными вычислительными ресурсами. Таким образом, при помощи разработанного ПО можно обрабатывать данные со скоростью, сопоставимой со скоростью предоставления данных от лидара.

Точность алгоритма – это величина среднеквадратичного отклонения точек построенной алгоритмом траектории движения робота от истинной траектории, записанной в предложенном наборе данных. Сравнение точности разработанного алгоритма проведено отдельно с одноагентным алгоритмом, а также с распространенным на данный момент графовым алгоритмом Google Cartographer. Результаты сравнения точности представлены на графике на рис. 4.

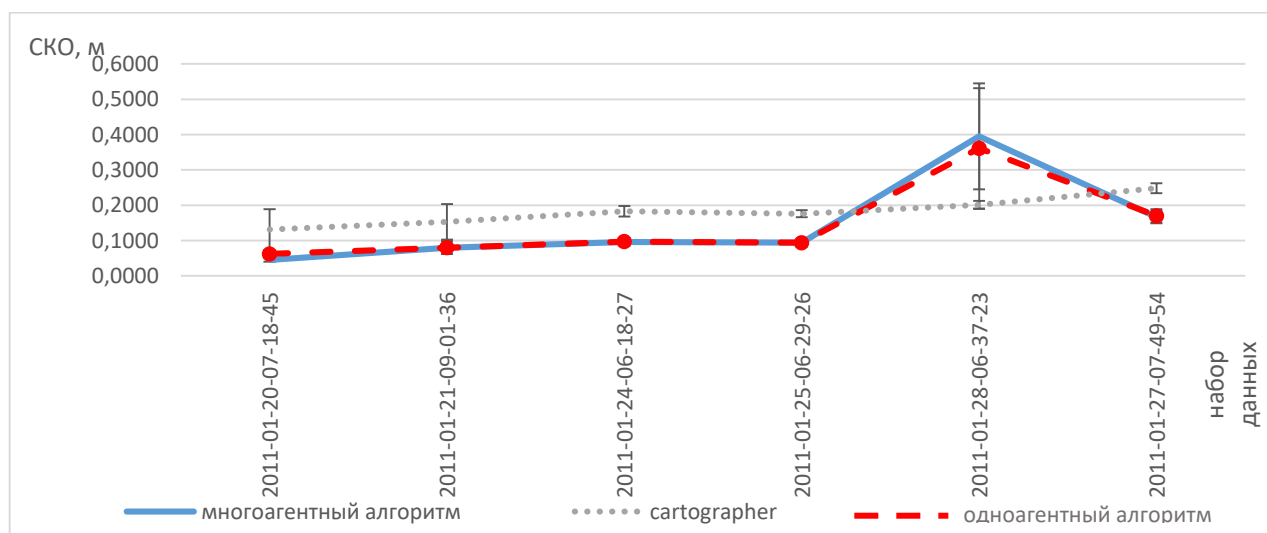


Рисунок 4 – Визуализация СКО многоагентного алгоритма, одноагентного алгоритма и алгоритма cartographer. Номера наборов данных соответствуют таблице 1.

<sup>1</sup> Robot Operating System <https://www.ros.org>

<sup>2</sup> Slam-structor на платформе github <https://github.com/OSLL/slam-structor>

Оценка границ применимости на малопроизводительных вычислительных устройствах производилась среди устройств Raspberry Pi. Тестирование проводилось на устаревших маломощных моделях и на новейших, обладающих значительными ресурсами. Приведем характеристики моделей вычислительных устройств.

1. Raspberry Pi 3 Model B (Процессор Broadcom BCM2837, оперативная память LPDDR2 1GB, операционная система Ubuntu Xenial x64).

2. Raspberry Pi 3 Model B+ (Процессор Quad Core 1.2GHz Broadcom BCM2837B0, оперативная память LPDDR2 1GB, операционная система UbuntuXenial x64).

3. Raspberry Pi 4 Model B (Процессор Quad Core 1.5GHz Broadcom BCM2711, оперативная память LPDDR4 2GB, операционная система Ubuntu Xenial x64).

4. Персональный компьютер (Процессор: Intel Core i7-860 4x2.8GHz, оперативная память DDR3 8GB, операционная система Ubuntu Xenial x64).

Количество лазерных сканов, обрабатываемых за секунду времени продемонстрировано на рисунке 5.

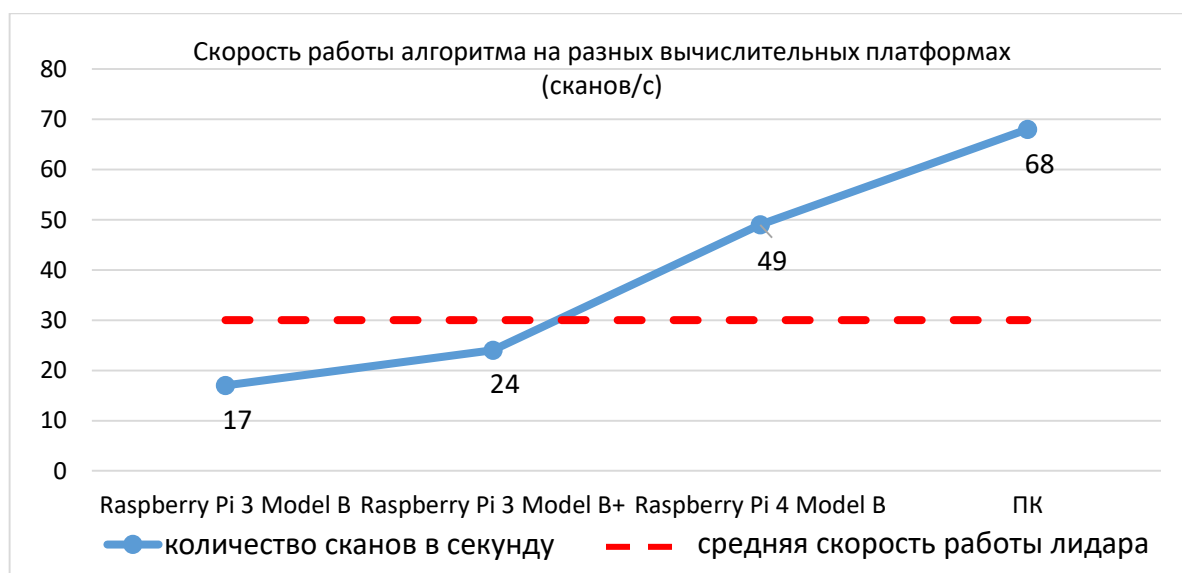


Рисунок 5 – График, демонстрирующий количество обрабатываемых сканов в секунду на различных вычислительных конфигурациях.



### **Основные результаты.**

1) Проведен сравнительный анализ и классификация существующих одноагентных и многоагентных алгоритмов, решающих задачу SLAM. Была построена классификация одноагентных алгоритмов по различным характеристикам.

2) Разработан масштабируемый алгоритм многоагентного решения задачи SLAM. Разработанный алгоритм имеет низкую вычислительную сложность за счет применения метода Монте-Карло в задаче скан-матчинга, а также отказа от графовой структуры алгоритма и применения теории Демпстера-Шафера. Горизонтальная масштабируемость алгоритма достигается отсутствием разделения ролей агентов, выполняющих его.

3) Разработан горизонтально масштабируемый алгоритм фильтрации двумерных лазерных сканов. Применение этого алгоритма позволяет уменьшить среднее время обработки лазерного скана более чем на 40% из-за быстрого определения корреляции скана с предыдущими.

4) Реализовано программное обеспечение, демонстрирующее работу разработанного алгоритма и позволяющее практически оценить качество алгоритма.

5) Определены характеристики точности, а также границы применимости на вычислительных устройствах, обладающих ограниченными ресурсами. Используемый в рамках проделанной работы алгоритм оказался точнее, чем популярное решение от Google – графовый алгоритм cartographer. Среднеквадратичная ошибка многоагентного алгоритма на дистанции 100 метров, пройденной одним агентом, при условии однократной синхронизации с другим агентом, составила 9,4 см. Погрешность определения позиции робота сопоставима с его габаритами, что свидетельствует о высокой точности разработанного алгоритма.

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о том, что достигнута цель работы – разработаны масштабируемые алгоритмы для многоагентного решения задачи SLAM, применимых для низкопроизводительных роботов. В дальнейшем возможно применение теории Демпстера-Шафера к алгоритму фильтрации данных, а также применение графовых алгоритмов определения лидера для увеличений точности объединения карт (в случаях, когда в синхронизации одновременно участвует более двух агентов).

### **Список публикаций в изданиях, входящих в перечень ВАК.**

1. Филатов Ан. Ю, Кринкин К.В., Филатов Ар.Ю., Гулецкий А.Т., Карташов Д.А. Сравнение современных лазерных алгоритмов SLAM // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2018. № 7. С.66–73.
2. Филатов Ан. Ю, Кринкин К.В., Филатов Ар.Ю., Чен Б., Молодан Д. Методы сравнения качества 2D-SLAM-алгоритмов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2018. № 7. С.87–95.

### **Список публикаций, индексируемых в базе данных SCOPUS.**

1. Filatov An., Krinkin K., Filatov Ar. The scan matchers research and comparison: Monte-carlo, olson and hough //2016 19th Conference of Open Innovations Association (FRUCT). IEEE, 2016. С. 99-105.
2. Filatov An., Krinkin K., Filatov Ar. 2D SLAM quality evaluation methods //Proceedings of the 21st Conference of Open Innovations Association FRUCT. 2017. С. 120-126.
3. Filatov An., Krinkin K., Filatov Ar. Data distribution services performance evaluation framework //2018 22nd Conference of Open Innovations Association (FRUCT). IEEE, 2018. С. 94-100.
4. Filatov An., Krinkin K., Filatov Ar. Evaluation of modern laser based indoor slam algorithms //2018 22nd Conference of Open Innovations Association (FRUCT). IEEE, 2018. С. 101-106.
5. Filatov An., Krinkin K. Multi-Agent SLAM Approaches for Low-Cost Platforms //2019 24th Conference of Open Innovations Association (FRUCT). IEEE, 2019. С. 89-95.
6. Filatov An., Krinkin K. A Simplistic Approach for Lightweight Multi-Agent SLAM Algorithm. // International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems (IJERTCS). - 2020 - Т. 1. - № 3. - С. 67-83.
7. Filatov An., Krinkin K., Correlation Filter of 2D Laser Indoor Scans. // Robotics and Autonomous Systems. – 2021. – Т. 142. – С. 91-99.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020610524. Программа для вычисления взаимного расположения агентов, выполняющих алгоритм решения задачи SLAM //Филатов А.Ю., Кринкин К.В.; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ» – заявка № 2019667191; заявл. 23.12.2019; зарегистр. 15.01.2020